

Постоянная Арнольда*

Журналу «Электричество», конечно, еще не раз придется возвращаться к трудам, оставленным профессором Арнольдом в наследство современному и будущим поколениям электротехников, для которых вся жизнь и деятельность Арнольда будут служить примером энергичной упорной и даровитой работы.

«Электричество», 1911, №17.

На протяжении уже более века практически во всех книгах по проектированию электрических машин, учебниках по этой специальности широко используется машинная постоянная Арнольда, которая, в частности, для машин постоянного тока записывается следующим образом¹ [1–3]:

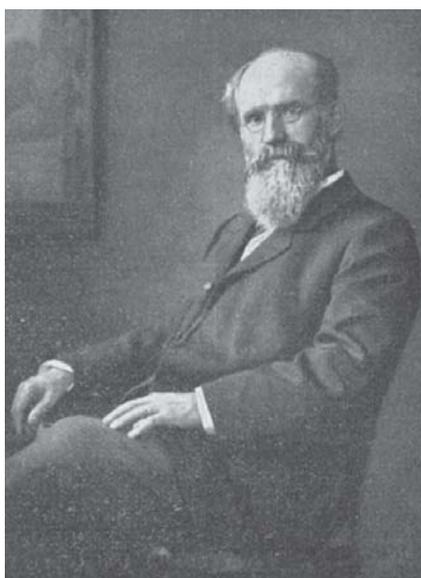
$$C_A = D^2 l_d n / P\Phi \\ = 6,1 \times 10^7 a_d B_d A,$$

где D – диаметр якоря, мм; l_d – расчетная длина магнитопровода, мм; n – частота вращения, об/мин; $P\Phi$ – расчетная мощность, Вт; A – линейная нагрузка обмотки якоря, А/см; B_d – значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; a_d – расчетный коэффициент полюсной дуги, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению.

Машинная постоянная позволяет определить основные размеры электрических машин (диаметр и длину) с учетом электромагнитных нагрузок, частоты вращения и ряда геометрических соотношений. За внешней лаконичностью и простотой этой удивительной формулы скрывается глубокий физический смысл электромеханического преобразования энергии. Машинная постоянная Арнольда универсальна и с небольшими изменениями применима для любого типа электромеханических преобразователей. Аналитические возможности этого соотношения по достоинству оценили ведущие электромеханики, построив алгоритм расчета электрических машин именно на его основе.

* Начало. Окончание в следующем номере.

¹ У разных авторов имеются некоторые отличия в обозначениях и размерностях величин, входящих в формулу, что не меняет ее смысла.



Энгельберт Арнольд (1856–1911)

В последние десятилетия современные методы проектирования электрических машин предполагают компьютерное моделирование. Использование постоянной Арнольда уходит из прикладной области в аналитическую. Тем не менее, и сейчас значение формулы, связывающей геометрические размеры электрической машины с ее мощностью и скоростью, огромно. Именно с помощью этого соотношения можно аналитически проследить влияние отдельных факторов на эксплуатационные характеристики и основные размеры, оценить степень использования активных материалов (проводниковых и магнитных) при различных значениях электромагнитных нагрузок.

Эту весьма удачную формулу предложил использовать еще в 1896 г. при проектировании электрических машин выдающийся электромеханик, уроженец Швейцарии Энгельберт Арнольд, в чью честь, собственно, она и названа [4]. Но это лишь часть громадного вклада, внесенного этим ученым-инженером в теорию и практику электрических машин. К сожалению, в персоналиях весьма подробного издания Академии электротехнических наук РФ, посвященного истории электротехники, не упоминается имя этого ученого. Факт тем более странен, что имя Арнольда очень тесно связано с Россией.

В ноябрьском номере журнала «Электричество» за 1911 г. опубликована речь председателя VI (электротехнического) отдела Императорского Русского технического общества профессора М.А. Шателена. Она была посвящена памяти Арнольда, скончавшегося неделей ранее. В своей речи Михаил Андреевич говорил о вкладе этого человека в развитие электромеханики: «Всем нам хорошо известно то значение, которое имели для электротех-

ников всего мира труды Арнольда: им была создана целая школа электротехников-машиностроителей, и под его доминирующим влиянием развивалось в течение более десяти лет электрическое машиностроение. Нам, русским электротехникам, Арнольд был особенно близок: не говоря уже о том, что сотни русских студентов и молодых инженеров работали под его непосредственным руководством, надо помнить, что более трети своей электротехнической жизни Арнольд провел в России, в России же он начал как профессорскую, так и инженерную деятельность» [5].

Энгельберт Арнольд родился в небольшом Швейцарском поселении Шлирбахе (Люцернский кантон) 7 марта 1856 г. в крестьянской семье. С 1874 по 1878 гг. учился в Цюрихском федеральном политехникуме по специальности «Машиностроение» и стал инженером-механиком. Работал конструктором на фирме «Уланд» в Лейпциге и инженером на машиностроительном заводе в Оффенбахе-на-Майне. В сентябре 1880 г. Арнольд получил приглашение Рижского политехникума и стал адъюнктом (помощником профессора) по механической специальности. Его руководителем был профессор К.Л. Моль. Молодой Арнольд преподавал техническое черчение и проводил практические занятия по проектированию. Учебная программа охватывала изучение широкого спектра машин и элементов их конструкции [6].

Рижский политехникум был создан в 1862 г. на частные средства. За образец при его устройстве было взято швейцарское Высшее Федеральное училище в Цюрихе. Политеху изначально покровительствовал генерал-губернатор Петр Романович Багратион, и выпускники вуза были приравнены в правах к выпускникам Петербургского института гражданских инженеров. В 1869 г. для Политехникума на берегу Рижского канала было построено великолепное здание, которое сейчас является главным корпусом Латвийского университета. Несмотря на принадлежность Латвии Российской им-



Рижский политехникум. Конец 19 в.

перии, преподавание велось на немецком языке, что позволяло пригласить преподавателей из Германии, Швейцарии и Австрии, да и население Риги более чем на 30% было немецкоговорящим. Учились в Политехе представители различных национальностей; это было одно из немногих учебных заведений России, где национальность и общественное положение не имели значения.

В то время в стенах Политеха работали выдающиеся ученые, впоследствии Нобелевские лауреаты по химии, такие как Вильгельм Фридрих Оствальд и Сванте Август Аррениус. Интересен факт, что Оствальд специально читал лекции медленно, чтобы не знающим немецкого языка было легче понять его. Одним из студентов Рижского политехникума был Михаил Осипович Доливо-Добровольский, ставший впоследствии родоначальником трехфазной электротехники [7]. Он учился на химическом факультете с 1878 г. Убийство Русского царя Александра II в 1881 г. вызвало волну репрессий по всей империи. Эти драматические события не обошли стороной и юного студента. Михаил Осипович за участие в студенческой забастовке солидарности с рабочими рижских заводов был 22 июня 1881 г. исключен из Политеха с запретом поступления в любое учебное заведение России. Он едет в Дармштадт (Германия) и продолжает учебу в Высшем техническом училище на машиностроительном факультете. Пути Арнольда и Доливо-Добровольского пересекутся вновь через 10 лет, когда они будут уже маститыми электромеханиками с мировыми именами, но об этом чуть ниже.

В конце 19 в. электротехника бурно развивалась: появлялись первые электростанции, совершенствовались электрогенераторы, прокладывались сети электрического освещения. Становилось очевидным, что в ближайшее время она будет одним из основных направлений в развитии техники и науки. Еще в 1876 г. в программу курса машиностроения Рижского политехникума были включены вопросы электромагнитных машин, а в курс физики — магнетизма и электричества. Арнольд выбрал для себя именно этот путь, и, как показало время, выбор был удачным. Первым шагом становится «пробная лекция» «Передача электрической энергии», прочитанная им 22 сентября 1883 г. Тема была весьма актуальной, электротехники столкнулись с серьезной проблемой ограничения радиуса действия сетей постоянного тока. Над ее решением работали лучшие умы того времени: Т. Эдисон, Дж. Гопкинсон, Д.А. Лачинов и др. За год до прочтения лекции Арнольдом была сооружена знаменитая электропередача постоянного тока от Мисбахы до Мюнхена длиной в 57 км. Авторами проекта были Марсель Депре и Оскар фон Миллер. Лек-

ция Арнольда имела успех, и уже 9 октября 1883 г. попечитель Дерпского учебного округа (в чьем ведении был до 1993 г. Рижский политехникум) по представлению Совета политехникума и директора утвердил Энгельберта Арнольда в качестве приват-доцента и разрешил ему вести лекции по машиностроению. Учебная программа предмета включала также и материалы по электротехнике.

Спустя три года механический факультет в соответствии с велениями времени проводит серьезную реорганизацию. Электротехника становится обязательным предметом, а Рижский политехникум — одним из первых в мире учебным заведением и первым в Российской империи по подготовке инженеров-электриков. В 1886 г. Арнольду присваивается звание доцента, и он начинает вести новый курс по электротехнике. Параллельно читает лекции по деталям машин и простым машинам, а также руководит занятиями по их проектированию [8]. Арнольд с головой окунается в работу, по его инициативе создается электротехническая лаборатория и вводится лабораторный практикум, в том числе по электрическим машинам. Проводятся специальные занятия по проектированию осветительных установок, электрических аппаратов и электрических машин.

Помимо преподавательской деятельности Арнольд со свойственной ему активностью включился в работу Рижского технического общества, образованного в 1858 г. Каждые две недели Общество издавало журнал «*Rigasche Industrie Zeitung*». В течение почти всего времени пребывания в Риге Арнольд входил в состав редакции. О его деятельности на этом поприще мы можем судить по многочисленным докладам, касающимся разных разделов электротехники. Именно здесь оттачивалось перо будущего классика, на трудах которого зиждется современная электромеханика.

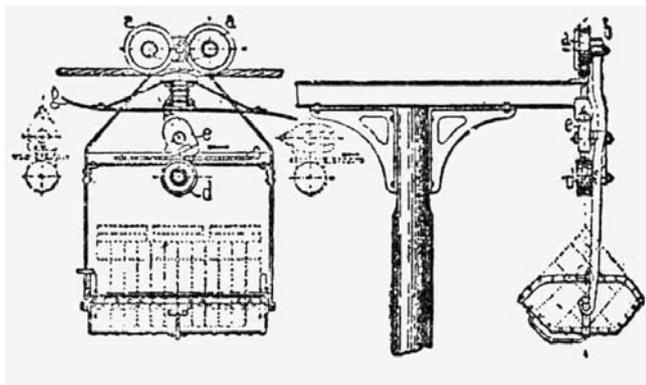
В 1887 и 1891 гг. Арнольд выступает с докладами об аккумуляторах. В то время, когда еще не установились современные схемы электроснабжения, шла упорная борьба между сторонниками постоянного и переменного тока, многие электротехники считали весьма перспективным направлением установку на центральных подстанциях накапливающих электроэнергию устройств [9]. Арнольд обращает особое внимание на большие перспективы высоковольтных систем переменного тока, связанных с передачей электроэнергии на значительные расстояния. Вместе с тем у него была следующая позиция: «Большим недостатком переменного тока является невозможность непосредственно запастись электрическую энергию в аккумуляторах. Аккумуляторы крайне необходимы, почти незаменимы на городских центральных электростанциях. Аккумуляторы

всегда готовы к действию. ...Аккумуляторы можно больше нагружать, чем электрические машины, и они обеспечивают лучший, чем электрические машины, привод машин, независимый от колебаний тока. Кроме того, надо указать, что этот привод рациональный, так как котел, паровая и динамомашинны всегда должны работать под полной нагрузкой, чтобы был хороший КПД.» [10]. Стоит заметить, что вопросы аккумулирования электроэнергии при переменном характере нагрузки актуальны и по сей день. Интересовали Арнольда и вопросы электрохимии. Рижский политех имел очень сильную химическую школу. В 1888 г. ученый готовит доклад по химическому действию электричества и его применению в металлургии и гальванопластике [11]. В докладе были освещены вопросы получения меди и алюминия электролитическим способом.

Арнольд изначально был механиком, машиностроителем. Плоды его почти десятилетней работы в этой области отразились в создании внушительного атласа «Детали машин». Это был первый подобный труд, изданный в России, правда, на немецком языке. Книга была создана совместно с его руководителем, профессором К.Л. Модем, с которым у Арнольда за долгие годы установились близкие отношения (Арнольд был женат на его дочери). Фамилия Арнольда стояла второй в этом труде, но под его руководством в Рижском политехе было создано подавляющее большинство чертежей, положенных в основу книги [12]. Атлас включал сложнейшие графостатистические расчеты и построения, 129 таблиц, многочисленные чертежи отдельных деталей машин, их сборочные чертежи во всевозможном сочетании и, наконец, чертежи самих устройств [13]. Журнал Общества германских инженеров отозвался об этом труде как об основе новой науки машиностроительного конструирования [14]. Для облегчения пользования альбомом Арнольд в журнале Рижского технического общества публикует подробную статью, объясняющую особо сложные для понимания разделы [15], чем демонстрирует еще одну важную черту своей деятельности — постоянное стремление к совершенству.

Глубокие фундаментальные знания Арнольда в механике находили применение и на практике. Известно его непосредственное участие в создании проволочно-воздушной железной дороги на цементном заводе Акционерного общества «Пахра» в Подольске. Сведения об этой канатной дороге приведены даже в Энциклопедическом словаре Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона [16].

В 1884 г. владелец небольшой монтажной фирмы и представитель нескольких берлинских электротехнических фирм, купец второй гильдии Ген-



Сцепной аппарат с муфтой проволочно-воздушной железной дороги

рих Деттман, также выходец из Швейцарии, при технической помощи Арнольда основал одно из первых в России электромашиностроительных предприятий. Одним из первых заказов было оборудование для электротехнической лаборатории Рижского политехникума. В 1887 г. по инициативе Арнольда были собраны средства в размере 10000 руб. на устройство лаборатории, и уже в 1889 г. Арнольд на заседании Рижского технического общества доложил о выполнении этой задачи [17].

С 1888 г. фирма Деттмана называлась «Российско-Балтийский электротехнический завод». В 1890 г. Арнольд становится его техническим директором. Завод изготовил первую динамо-машину, установленную на цементной фабрике Шмидта в Риге. Весьма интересна дальнейшая судьба этого завода. В 1898 г. предприятие было приобретено фирмой «Унион». Через несколько лет в 1904 г. после поглощения фирмы «Унион» германской «Всеобщей компанией электричества» (AEG) рижский завод становится Акционерным русским обществом «Всеобщая компания электричества». Завод производил электрические машины, трансформаторы, распределительные устройства, электроаппаратуру для флота и ряд другого электрооборудования. Число рабочих в 1913 г. составляло 2020 чел. [18]. В 1915 г. линия фронта приблизилась к Риге, завод эвакуировали, погрузив станки и людей в 1420 вагонов. Большая часть переехала в Харьков. В 1925 г. предприятие стало называться Харьковским электромеханическим заводом (ХЭМЗ).

Арнольд преподавал электротехнику — весьма обширную дисциплину, но постепенно формируется его научное увлечение — он отдает предпочтение электрическим машинам. Этому весьма способствуют блестящие знания Арнольда в области механики и машиностроения, с одной стороны, и опыт работы на Российско-Балтийском электротехническом заводе, с другой. Электромеханика — вот путь, по которому он будет отныне следовать.

В начале 1891 г. в Рижском техническом обществе прозвучал большой доклад Арнольда «Магнитная индукция, динамомашины и трансформаторы» [19], автор доклада продемонстрировал и динамо-машину собственной конструкции. В том же году, в марте, Арнольд публикует очень важную работу «Якорные обмотки динамо-машин постоянного тока» [20]. По словам выдающегося электротехника Бориса Ивановича Угримова, появление этого труда Арнольда было «своего рода эрой в электротехническом машиностроении». Остановимся на нем подробнее. Необходимо сказать, что к концу 80-х годов 19 в. машина постоянного тока была уже неплохо разработана и включала практически все элементы современной конструкции. Граммовская обмотка якоря отживала последние дни, на смену ей пришла однослойная барабанная обмотка, предложенная впервые еще в 1882 г. Гефнер-Альтенеком. Следующим шагом было использование двухслойной барабанной обмотки для гладкого якоря двухполюсной машины, изобретенной Вестонем. В 1883 г. Мерон и Кинод изобретают простую параллельную барабанную обмотку многополюсной машины, а Мордей — уравнивательные соединения. В 1884–1885 гг. появляются добавочные полюса и компенсационная обмотка для улучшения коммутации, в это же время начинается применение шаблонной обмотки, с использованием которой значительно понизилась стоимость машины при одновременном улучшении рабочих свойств якоря.

Таким образом, конструкция обмоток машины постоянного тока развивалась весьма динамично. В чем же тогда состояла ценность книги Арнольда? Обратимся к рецензии в «Журнале Общества германских инженеров», которая ярко характеризовала назревшую проблему: «Схема якорных обмоток, т.е. соединение отдельных якорных частей машин постоянного тока, определяется большей частью эмпирически... Первые соединения катушек двухполюсных кольцевых и барабанных машин выполнялись в строгом заводском секрете... Однако постепенно число выполненных соединений заметно выросло, и поэтому появилась насущная необходимость их упорядочить и установить закон, с помощью которого можно было бы выполнить новые соединения. Автор дал этот закон» [21].

До написания книги Арнольда в мировой электромеханике теории обмоток не существовало. Этот важнейший элемент электрической машины проектировался либо по наитию конструктора, либо с учетом предыдущего многолетнего опыта. Не было и разработанной технологии изготовления. По образному выражению проф. В.А. Толвинского, «В 1891 г. Арнольд создал стройную теорию

обмоток электрических машин постоянного тока, которая положила конец кустарничеству в этой трудной области и этим способствовала быстрому прогрессу в области электрических машин постоянного тока» [22].

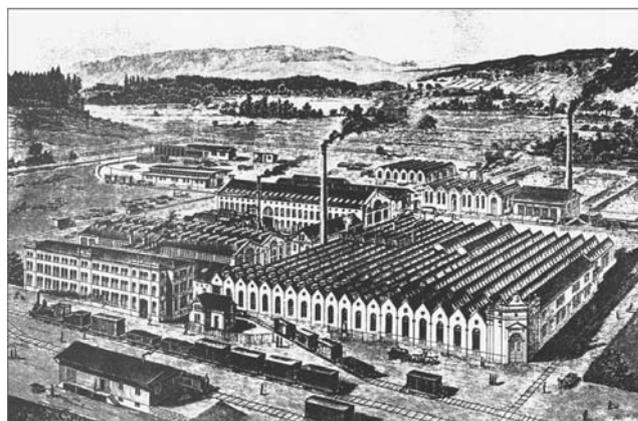
В предисловии к своей книге Арнольд пишет: «Отличительные и общие свойства различных обмоток могут быть точно установлены при помощи правил включения. Родство кольцевых, барабанных и дисковых обмоток при этом становится отчетливым, и переход от одной обмотки к другой выполняется без трудностей. Правило включения охватывает, однако, не только известные обмотки, но и позволяет много больше. Оно дает общее решение обмоточной проблеме. При его помощи и посредством изложенных в первом разделе способов соединения индуктивных проводников возможно проектировать новые обмотки. В последующих разделах представлены многие обмотки, до этого мне не известные».

Труд Арнольда моментально был замечен и стал хрестоматийным. В качестве примера приведем цитату из монографии Гисберта Каппа «Динамомашинны. Альтернаторы и Трансформаторы», изданной всего через год после публикации Арнольда². Капп при изложении материала своей книги, касающегося построения обмоток, пишет: «Объем моего сочинения позволяет сообщить лишь некоторые, наиболее распространенные типы обмоток. Желая ознакомиться с этим предметом более подробно должны обратиться к прекрасной, хотя небольшой книге д-ра Арнольда «Якорные обмотки динамомашин постоянного тока». Доктор Арнольд излагает предмет в весьма удобопонятной форме и показывает, как можно представить всякую данную обмотку и изобрести новые посредством алгебраических формул и диаграмм» [23]. Спустя почти 100 лет профессор И.П. Копылов в учебнике «Электрические машины» напишет: «Первой теоретической работой по проектированию электрических машин можно считать работу Э. Арнольда по теории и конструированию обмоток» [24].

В том же 1891 г. Арнольд уезжает из Риги, по словам Б.И. Угримова, «не по своей воле». В этот год преподавание в Рижском политехникуме стало вестись на русском языке. Арнольд плохо знал русский и «не без сожаления» вернулся в Швейцарию. Покидают Рижский политехникум и многие другие немецкие профессора, из преподавателей осталась

лишь половина. Качество образования резко снизилось. В 1897 г. ректор Харьковского технологического института В.Л. Кирпичев посетил Рижский политехнический институт (годом ранее преобразованный из Рижского политехникума) для оценки уровня преподавания. Да, официальный статус был повыше, но Кирпичев с горечью отмечал: «Для успеха высшего учебного заведения имеет главное значение талант профессоров, в нем преподающих».

В это время во Франкфурте-на-Майне проходила Международная электротехническая выставка. Выставка вошла в мировую историю сооружением и демонстрацией Лауфен-Франкфуртской трехфазной электропередачи, которую осуществили два гениальных инженера-конструктора: М.О. Доливо-Добровольский, работавший в «АЕГ», и Чарльз Браун – технический директор Швейцарского завода «Эрликон». В период работы выставки проводился Международный электротехнический конгресс, на котором был заявлен доклад Энгельберта Арнольда с «темой, которая будет указана дополнительно». Но фамилии Арнольда нет ни в списке участников, ни выступавших. В тот момент его заботила проблема трудоустройства. Судьбе было угодно сделать так, что Арнольд вскоре стал одним из первых конструкторов трехфазных двигателей. Осенью этого года Чарльз Браун уволился из «Эрликона» и 1 октября 1891 г. вместе со своим коллегой Вальтером Бовери открыл собственное предприятие «Браун, Бовери и К°» в г. Баден. На освободившееся в «Эрликоне» вакантное место был принят Арнольд. Это было очень смелым шагом как руководства «Эрликона», так и самого Арнольда. «Эрликон» к тому времени – одно из крупнейших электротехнических предприятий Европы, а у Арнольда был только практический опыт технического руководства небольшого Российско-Балтийского электротехнического завода. Предыдущий технический директор «Эрликона» Ч. Браун был уже признанным конструктором как электрических



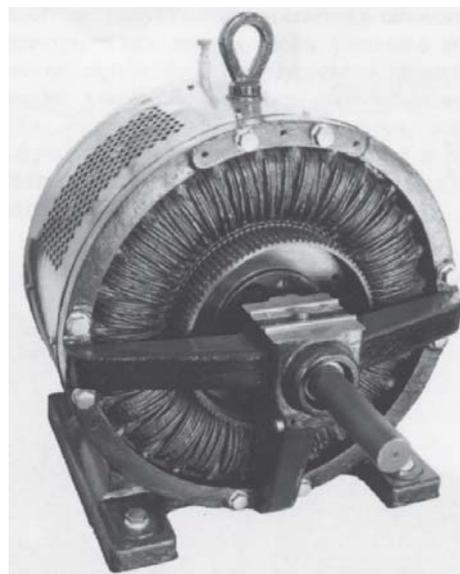
Машиностроительное предприятие «Эрликон»
(конец 80-х годов 19 в.)

² Гисберт Капп был международно признанным авторитетом в области электротехники и электромеханики. В 1887 г. он вывел знаменитую формулу трансформаторной ЭДС, известную каждому электротехнику. Капп являлся на тот момент инженером-консультантом международного уровня, участвовал во всех важных мероприятиях, связанных с электричеством, и очень внимательно следил за прогрессом в области электротехники.

машин, так и высоковольтных электропередач. Арнольду только предстояло доказать свою состоятельность в качестве технического руководителя такого масштаба. Следует, однако, отметить, что между Э. Арнольдом и Ч. Брауном установились отличные отношения. В своих будущих книгах Арнольд в качестве образцовых примеров неоднократно приводил конструкции «Браун, Бовери и К°».

О работе Арнольда в тот период можно судить по отрывку из статьи М.О. Доливо-Добровольского «Из истории трехфазного тока» [25]. Приведем его почти полностью, поскольку он очень точно описывает те задачи и проблемы, которые стояли перед конструкторами электродвигателей того времени. Михаил Осипович был техническим руководителем компании «АЕГ». «Эрликон» и «АЕГ» выполняли много общих проектов, и Доливо-Добровольский тесно работал с Арнольдом. Сразу после знаменитой Лауфен-Франкфуртской трехфазной электропередачи 1891 г. Лауфенская электростанция стала снабжать г. Хайльбронн трехфазным током. У «АЕГ» возникла необходимость срочно наладить серийное производство асинхронных трехфазных двигателей мощностью от 0,5 до 10 л.с. Вот что пишет Михаил Осипович об этом проекте: «Я установил, что барабанная обмотка является наилучшей (по сравнению с граммовской), но, с другой стороны, опасался наматывать такой барабанный статор тонкими проводами в полузакрытых пазах (в то время технология изготовления обмоток была еще несовершенна. — *Авт.*), я обратился к следующей форме решения вопроса. Электродвигатель имел обмотку из стержней и вилок³... При расчете требуемое напряжение оказалось очень низким (например, только около 10 или 20 В), но зато на плите, на которой устанавливался электродвигатель, был помещен маленький трансформатор. Этот трансформатор поднимал напряжение на электродвигателе до напряжения сети, составляющего примерно 110 В». Таким образом, дополнительный трансформатор на каждый двигатель значительно усложнял конструкцию и увеличивал стоимость устройства. Продолжим описание Доливо-Добровольского: «На дружественном нам машиностроительном заводе «Эрликон» после ухода Брауна опыты продолжал Арнольд... «Эрликон» выпустил в качестве промышленного типа конструкцию, представляющую возврат к моему первому электродвигателю с кольцом Грамма, но с учетом признанного теперь принципа минимального рас-

сеяния... Для снижения рассеяния сотрудники «Эрликона» прибегли к чрезвычайно маленькому воздушному зазору между индуктором и якорем; они взяли около 0,5 мм, в то время как в «АЕГ» зазор 1 мм считали слишком маленьким с технической точки зрения. Таким образом, кольца Грамма снова становились приемлемыми, а поскольку их можно было наматывать непосредственно для 110 В и выше, то эти моторы обходились дешевле, чем выпускаемые нами. Поэтому «АЕГ» вскоре переключилась на типы «Эрликона». Этот тип электродвигателя «АЕГ» выпускала в течение нескольких лет в очень большом количестве; эти электродвигатели, работающие в нелегких условиях, можно встретить на многих установках еще и теперь (т.е. более чем 20 лет спустя после установки). Это является, несомненно, также свидетельством механической прочности конструкции того времени. Только к концу 90-х годов, когда вопрос о трехфазном токе был уже хорошо разработан, повсеместно возвратились, и теперь уже окончательно, к барабанному типу. За это время мы научились лучше наматывать обмотку для этого типа и таким образом смогли использовать его преимущества в отношении особенно низкого рассеяния и еще лучше использовать материал». Интересно, что, по сведениям О.Н. Веселовского, один такой двигатель с граммовской обмоткой статора и короткозамкнутой обмоткой ротора мощностью в 4,5 кВт М.О. Доливо-Добровольский подарил Московскому политехническому музею [26]. Этот двигатель и сейчас можно видеть в музее как свидетельство совместной работы двух гениев — Доливо-Добровольского и Арнольда.



Асинхронный двигатель конструкции М.О. Доливо-Добровольского—Э. Арнольда

³ В пазы статора закладывались медные изолированные стержни, концы которых собирались на лобовых частях в схему. Таким образом в каждом пазу был только один проводник. Чтобы создать необходимую МДС, по стержням должен был протекать большой ток при малом напряжении на зажимах.

На заводе «Эрликон» Арнольд проработал до 1894 г. Под его руководством созданы серии различных электрических машин, «настоящих шедевров электротехники». Он первый применил «к грузоподъемному делу катящуюся балку с установленным на ней электродвигателем». Арнольд не забывал и о своем первенце Рижском заводе, консультируя его специалистов по текущим проектам электрических машин. Занимаясь практическими вопросами «Эрликона», Арнольд находил время и для научной работы. Он накапливал колоссальный объем статистического материала по проектированию электрических машин, публикуя одновременно одну статью за другой. Помимо постоянной научной темы (обмотки коллекторных электродвигателей постоянного тока) его интересовал и однофазный асинхронный двигатель, и модернизация репульсивного электродвигателя. А главное, именно в «Эрликоне», коммерческом предприятии, главной целью которого был финансовый успех, Арнольд сформулировал для себя основной принцип инженерного искусства: «Задача инженера состоит в том, чтобы удовлетворить всем поставленным требованиям при минимуме затрат. Чтобы возможно ближе подойти к этому минимуму, нужно возможно тщательнее рассчитать машину, а для этого нужно знать ее теорию» [27].

Имя Арнольда становится известным в электротехническом мире. В 1894 г. в Высшей технической школе Карлсруэ решались проблемы по организации электротехнического отделения. Высшая техническая школа была преобразована в 1865 г. из Политехникума в Карлсруэ Великим герцогом Баденским Фридрихом I и потому носила его имя — «Фридрициана». Это было старейшее высшее учебное заведение в Германии и четвертое в Европе после парижского, пражского и венского. Здесь работали и учились такие известные люди, как нобелевский лауреат Карл Фердинанд Браун, первооткрыватель жидких кристаллов Отто Леманн и изобретатель автомобиля Карл Бенц. Арнольд был приглашен на должность профессора по электротехнике. Его задача заключалась в организации всего процесса преподавания на этом отделении. До приглашения Арнольда лекции по электротехнике читали преподаватели Института физики. Число студентов в первый семестр составило 43 чел. В 1896 г. благодаря активной деятельности Арнольда началось строительство Электротехнического института. Официальное открытие института состоялось 18 мая 1898 г. Речь Арнольда на открытии, в которой он дал обзор состояния электротехники того времени, вызвала большой интерес. Он, в ча-

стности, сказал: «Электрические явления изучались в течение многих десятилетий подряд только в физических кабинетах... длительное время носителями электротехнических знаний являлись физики и они же занимались конструированием динамо-машин и осветительных систем. Более интенсивное развитие и полное доверие к достижениям высокоточной электротехники пришло лишь тогда, когда инженер смог в полной мере вступить в свои права. Сегодня в электрической промышленности царит инженерное дело. Создание машин мощностью в тысячи лошадиных сил и строительство огромных электростанций вывело инженера на должный уровень, начав со скромных достижений, он достиг великой цели. Высшие технические школы следили за этим превращением. Электротехника как учебная дисциплина отделилась от чистой физики, и у высших технических учебных заведений все сильнее проявляется стремление выпускать не физиков-электриков, а инженеров-электриков, разбирающихся в технике» [28].

В Германии к тому времени было уже несколько высших учебных заведений, где обучение электротехнике было блестяще организовано. Ни одна страна в мире не имела столько высших, средних и низших электротехнических школ. В Дармштадте преподавал выдающийся ученый и педагог профессор Эразм Киттлер. В Берлине специальное электротехническое отделение возглавлял пионер радиосвязи Адольф Слаби, здесь вел одно время занятия уже упоминавшийся выше Гисберт Капп. Следует также назвать подобные учебные заведения в Мюнхене и Штутгарте. Перед Арнольдом встала сложная задача: максимально быстро достичь уровня преподавания и научных исследований в этих известных вузах.

Институт Арнольда был великолепно оснащен многочисленными лабораториями, имел собственную электростанцию. Число обучающихся резко возросло и составляло в летнем семестре 1898 г. 86 практикантов и 166 студентов. В стенах вуза выполнялись серьезные научные исследования в различных направлениях электротехники. По словам современников, преподавание здесь было поставлено на «недосягаемую высоту». Арнольд создал блестящую научную школу, воспитав и объединив вокруг идеи разработки теории и методики расчета электрических машин своих учеников и коллег. Русский учёный-энциклопедист П.Д. Войнаровский, профессор Петербургского электротехнического института, в статье «Электротехнические учебные заведения» пишет: «...имеется институт в Карлсруэ, основанный в 1896 г. и организованный



Электротехнический институт в Карлсруэ
(современный вид)

профессором Арнольдом, преподававшим раньше в Рижском политехникуме. В институте Арнольда в особенности хорошо поставлена электромеханика (построение динамо-машин, электродвигателей и трансформаторов)» [29].

Всего за несколько лет совместно со своими учениками Иенсом Лассеном Ла-Куrom, Оле Зивертом Брагштадом и Альфредом Френкелем Арнольд создает серию фундаментальных трудов, охватывающих все в то время известные типы электрических машин. Приведем перечень, составленный Манфредом Майером, трудов Арнольда и его учеников за время работы в Карлсруэ [30]:

1902 г. Машины постоянного тока. Т. 1. Теория машин постоянного тока;

Техника переменного тока. Т. 1. Теория переменных токов;

1903 г. Машины постоянного тока. Т. 2. Конструкция, расчеты, исследования и режимы работы;

1904 г. Техника переменного тока. Т. 2. Трансформаторы: теория, конструкция, расчеты и режимы работы; Техника переменного тока. Т. 3. Обмотки машин переменного тока;

Техника переменного тока. Т. 4. Синхронные машины переменного тока. Генераторы, моторы и преобразователи: теория, конструкция, расчеты и режимы работы;

1906 г. Коммутация коллекторных машин постоянного и переменного тока;

1909 г. Техника переменного тока. Т. 5. Асинхронные машины переменного тока. Ч. 1. Асинхронная электрическая машина: теория, конструкция, расчеты и режимы работы;

1912 г. Ч. 2. Коллекторные машины переменного тока: теория, конструкция, расчеты и режимы работы.

Книги мгновенно раскупались, приходилось печатать дополнительные тиражи. Интересна заметка в российском журнале «Электричество» о появлении нового труда Арнольда. Она начинается словами: «Не проходит года, чтобы неутомимый профессор Арнольд не выпустил какого-либо сочинения» [31]. Просматривая его работы, задаешься вопросом: как это все можно успеть? Многие тысячи страниц строгого научного, но в то же время понятного, методологически выстроенного изложения. Фундаментальные исследования в области электрических машин – тысячи рисунков, графиков, чертежей, фотографий. Трудно поверить, что до Арнольда ничего подобного не существовало. Это его детище. Именно Арнольд построил каркас современной электромеханики. Ла Кур позже напишет, что этот грандиозный труд «мог возникнуть только потому, что создание предпринял человек со столь редкой трудоспособностью и нестигаемой энергией». «Форсированный научный прорыв в области электрических машин» – так называли то, что сделал Арнольд. «Властитель электротехники» – так величали его коллеги.

И еще один важный момент. Труды Арнольда изобиловали конкретными примерами электрических машин, ведущих мировых компаний того времени: «Эрликон», «Браун, Бовери и К°», «АЕГ», «Вестингауз Электрик», «Сименс и Гальске» и др. Особенности конструкции тщательно, до мелочей, разбирались, давая таким образом возможность изучающему подробно ознакомиться с новейшими разработками в области электромеханики. Современные учебники, к сожалению, зачастую отличаются отсутствием конкретных примеров продукции мировых лидеров электромашиностроения и достижений в этой области. В то далекое время понятие «передача технологий» было более действенным, чем в наши дни. Материалы из книг Арнольда расходились цитатами, а то и целыми главами по многочисленным учебникам различных авторов. Так, например, журнал «Электричество» опубликовал в 1904 г. рецензию на книгу профессора Харьковского технологического института П.П. Копняева «Динамомашин постоянного тока», в которой автор «подробно излагает теорию обмоток (по Арнольду)⁴» [32]. Правда, в последующем, чем больше времени проходило с момента выхода книг Арнольда, тем все меньше и меньше электротехники (в том числе и именитые классики этой науки) ссылались на первоисточник, отнюдь не по причине его устаревания.

⁴ Этот фундаментальный труд Павла Петровича Копняева «Электрические машины постоянного тока» на протяжении последующих трех десятилетий был одним из основных учебников при подготовке инженеров-электромехаников страны.

Постоянная Арнольда*

Особый интерес для Арнольда представляли две темы: обмотки электрических машин и коммутация коллекторных машин, которую он также подробно исследовал. Несмотря на многие десятилетия эксплуатации коллекторных машин, проблемы коммутации в то время были еще мало изучены. Это сильно мешало как при проектировании, так и при эксплуатации. Задача разработки теории коммутации становилась все более актуальной в связи с постоянно возрастающей мощностью машин постоянного тока. Разработка теории коммутации была сложной комплексной задачей. Арнольд писал: «Установить теорию коммутации было сопряжено с большими трудностями. Нужно было произвести подробные исследования и расчеты, чтобы получить результаты, которые можно было бы просто и удобно применить при предварительном расчете машины... Теория коммутации является не только интересной математической проблемой, она имеет еще важное экономическое значение для динамостроения... Без точного знания процессов коммутации и знания величин, оказывающих влияние на эти процессы, невозможно вычислить наивыгоднейшие размеры машины». Уровень работ по исследованию коммутации, выполненных Арнольдом, был очень высок. Проводились как теоретические, так и экспериментальные исследования на многочисленных специально для этих целей построенных установках. Приведем далеко не полный список экспериментальных исследований коммутации, показывающий тщательность подхода к этой проблеме [33]:

магнитные измерения (снятие кривой поля, измерение коэффициента рассеяния);

измерение разности потенциалов (между коллектором и щеткой, между пластинами, потенциальные кривые под щеткой);

исследование коммутации при различных режимах работы (холостой ход, нагрузка, короткое замыкание);

исследование переходного падения напряжения, переходного сопротивления и переходных потерь в щетках в различных режимах работы и при разных плотностях тока.

Уместно отметить, что подобные исследования до сих пор проводятся при разработке новых коллекторных электрических машин.



Контактный аппарат для исследования коммутации

Эксперименты делались даже с применением осциллографии, что в то время было большой редкостью. Соавтором Арнольда в этих исследованиях стал И.Л. Ла-Кур. Теорией коммутации Арнольд занимался многие годы. Аналитические, графические и экспериментальные исследования нашли отражение в десятках его трудов. Параллельно с Арнольдом эту проблему исследовали П. Жиро и Ж. Фишер-Гиннен. Они независимо от Арнольда пришли к одинаковым результатам. Эта теория получила название «классической теории коммутации» или «теории коммутации Арнольда» — автора, более других исследователей поработавшего над ее развитием.

На русском языке было два издания книг Арнольда: в 1909 г. — «Динамомашин постоянного тока» в 2 томах и в 1931 г. — «Машины постоянного тока» тоже двухтомник. В предисловии к советскому изданию говорится: «Машины постоянного тока» Э. Арнольда представляет собой как по объему и содержанию, так и по своему значению капитальный труд в области электромашиностроения. Целое поколение электротехников, в частности и русских, посвятивших себя работе по электромашиностроению, изучало этот вопрос, пользуясь книгами Э. Арнольда. Почти во всех руководствах для более детального ознакомления с подавляющим числом отдельных моментов из теории, конструкции и расчета электрических машин авторы до сих пор отсылают читателей к Арнольду, как к первоисточнику». Издание 1931 г. было переработано и дополнено И.Л. Ла-Куrom. Большую ре-

* Окончание. Начало в № 4, 2012.

докторскую работу при подготовке этого издания провели Е.В. Нитусов⁵ и Г.Н. Петров⁶, принимавший также участие в переводе ряда глав. Именно это издание, вышедшее большим тиражом, стало основной работой Арнольда, доступной для изучения широким кругом советских электромехаников.

Достижения Арнольда как ученого и преподавателя получили признание еще при его жизни. В 1905 г. он был произведен в тайные советники, в 1906–1907 гг. был ректором Высшей школы «Фридрициана», в 1906 г. Высшая техническая школа Ганновера присвоила ему степень почетного доктора-инженера.



Публикации Э. Арнольда на русском языке

В жизни Арнольда отмечали как «замечательно гуманного и отзывчивого на все светлое и благородное человека». Б.И. Угримов, который учился у Арнольда в Карлсруэ, пишет об этом: «Поистине, можно сказать, что в отношении электротехнического машиностроения Карлсруэ сделалось своего рода Меккою, куда со всех концов мира из Германии, Франции, Швейцарии, Австрии, Англии, Италии, России, Северной Америки, Бразилии и Австралии стекались правоправные электротехники послушать великого учителя, поучиться у гениального конструктора-изобретателя. Вскоре вокруг Арнольда образовалась целая школа его учеников, ставших, в свою очередь, видными деятелями на электротехническом поприще. Арнольд был в общении со своими учениками родным человеком, отечески требовавший интенсивного труда, обод-

рванный падающих духом, и всегда удивительно внимательный и вдумчивый при проявлении учеником какой-либо инициативы в области искания новых форм электротехнического машиностроения» [34].

Колоссальный объем работы, выполняемый Арнольдом, не мог не сказаться на его здоровье. 16 ноября 1911 г. Энгельберт Арнольд скончался от болезни сердца в возрасте 55 лет. Смерть его была неожиданна и произвела шок в электротехническом мире. «Боль, скорбь, сочувствие...» — эти слова прозвучали вслед уходящему гению. Пожалуй, ни один пионер электротехники не устаивался таких слов при прощании, как Арнольд. Для всех это было личной утратой. Российский научный мир откликнулся на смерть Арнольда многочисленными некрологами, траурными собраниями и заседаниями. Память об Арнольде почитали вставанием. В телеграмме от имени VI (электротехнического) отдела Императорского Русского технического общества ректору Высшей технической школы в Карлсруэ говорилось: «Смерть профессора Арнольда — невосполнимая потеря для электротехников всего мира». Профессор Петербургского политехнического института С.Н. Усатый писал: «Электротехнический мир потерял большого человека. Смерть профессора доктора-инженера Э. Арнольда глубоко затронула нас, русских электриков, среди которых так много его учеников и еще более почитателей и поклонников его трудов, его школы» [35]. Но самые проникновенные слова прозвучали из уст его ученика Б.И. Угримова: «С уверенностью можно сказать, что творения Арнольда не имеют соперника, и многочисленные почитатели великого человека, провожавшие его... утешались тем, что ясно осознавали, что ... дух его, живущий в его творениях, в той яркой полосе знания, которую пробороzdила закатившаяся звезда, останется вечным и нетленным».

Говоря о школе Энгельберта Арнольда, нельзя не сказать о Рудольфе Рихтере как о его приемнике. Рихтер был уже широко известен в электротехническом мире как выдающийся инженер, когда на него обратил внимание Арнольд и предложил ему внеочередную профессорскую должность в своем институте. Это случилось в 1911 г. К этому времени Рихтеру исполнилось 34 г. За его плечами была успешная работа в конструкторских бюро, испытательных цехах, руководстве производств различных типов электрических машин. Многочисленные изобретения, глубокие познания в электромеханике, кипучая деятельность и широкие связи в научном и деловом мире выдвинули его в ряды крупнейших специалистов-электромехаников. После смерти Арнольда Рихтер принял руководство Элек-

⁵ Е.В. Нитусов — впоследствии профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование текстильных фабрик» МЭИ; в настоящее время это кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок.

⁶ Г.Н. Петров — впоследствии член-корреспондент АН СССР, руководивший кафедрой «Электрические машины» МЭИ с 1938 по 1973 гг.



Рудольф Рихтер (1877–1957)

тротехническим институтом в Карлсруэ 1 октября 1912 г. и проявил себя достойным последователем своего великого предшественника. За 45 лет деятельности в институте он создал фундаментальный пятитомный труд по электрическим машинам. Структура пятитомника была похожа в целом на труды Арнольда и охватывала практически все направления электромеханики того времени: машины постоянного тока, трансформаторы, синхронные машины и одноякорные преобразователи, индукторные машины, индукционные машины, коллекторные машины однофазного и многофазного переменного тока, регулировочные агрегаты. Про-

фессор Ю.С. Чечет так напишет об этой работе: «Можно без преувеличения сказать, что труд Рихтера является энциклопедией теоретического электромашиностроения» [36]. Все пять томов переведены на русский язык. В переводе и редактировании книг Рихтера активное участие принимали Ю.С. Чечет, Г.Н. Петров и М.П. Костенко. В своих работах Рихтер развил идеи Арнольда, расширил области теории электрических машин, ликвидировав ряд существующих пробелов в электромеханике, связанных с разрывом между расчетной моделью и практикой. Многие машины в то время рассчитывались для идеальных условий, и потом по результатам экспериментов и статистических данных вводились поправочные коэффициенты. Рихтер усовершенствовал модели электрических машин, сняв тем самым необходимость таких поправок. Точность расчетов резко повысилась, появилась возможность моделирования и оптимизации более сложных электромеханических устройств. Арнольд и Рихтер после глубоких исследований получили фундаментальные результаты по магнитным потерям и высшим гармоникам в машинах переменного тока, теории и схемам обмоток, внесли весомый вклад в создание теории коммутации коллекторных машин.

Многие из выдающихся российских электротехников учились у Арнольда. Мы уже упоминали выше Б.И. Угримова – первого московского профессора-электротехника, одного из основателей московской электротехнической школы, участника разработки плана ГОЭЛРО. В 1898 г. «ввиду успешных занятий» Учебный комитет при Императорском Московском техническом училище пре-



Борис Иванович Угримов (1872–1941)



Клавдий Ипполитович Шенфер (1885–1946)

доставил ему заграничную командировку. Борис Иванович выбрал Берлинскую высшую школу, славившуюся фундаментальной подготовкой в области электротехники. Прозанимавшись там год, он для продолжения образования переехал в Карлсруэ к Арнольду, где занимался около года. До конца дней Б.И. Угримов почитал своего учителя.

Основатель кафедры электрических машин Московского энергетического института, академик Клавдий Ипполитович Шенфер в 1911–1912 гг. находился по рекомендации К.А. Круга и Б.И. Угримова в научной командировке в Карлсруэ для подготовки к профессорскому званию. Он работал в лаборатории Э. Арнольда, где экспериментально исследовал вопросы коммутации коллекторных машин переменного тока. В дальнейших фундаментальных работах Шенфера много раз звучит имя Арнольда и представителей его школы. К.И. Шенфер участвовал также в подготовке к изданию книги Арнольда «Машины постоянного тока» на русском языке (1931г.).

Вернемся к машинной постоянной Арнольда.

В процессе своей работы на Российско-Балтийском электротехническом заводе и в «Эрликоне» Арнольд при проектировании электрических машин постоянно сталкивался со сложнейшей многовариантной задачей. Необходимо было увязать в единое целое мощность, частоту вращения, габаритные размеры машины, условия охлаждения и добиться при этом приемлемых технических, энергетических и стоимостных показателей. Все многократно усложнялось при проектировании серии электрических машин. В решении этой проблемы на первое место ставилась задача создания методики предварительного проектирования, при котором максимально быстро получался результат, наиболее близкий к конечному. Анализируя всевозможные варианты предварительных расчетов, можно было бы найти оптимальное решение и далее уже детально прорабатывать его. Арнольд так пишет о важности предварительного проектирования: «Часто встречаются динамомашин постоянного тока, не удовлетворяющие экономичности. Не чувствуя себя достаточно уверенными в предварительном расчете, строят машины с большим запасом, так как последствия от неудачи могут оказаться дороже, чем слишком тяжелая машина. При этом, конечно, бывает, что построенная с большим запасом машина работает не совсем удовлетворительно или даже совсем неудовлетворительно. Я того мнения, что предварительный расчет машины должно делать с возможно большей тщательностью и что время, употребленное на это, не будет потраченным впустую. ... Инженер получит более оптимальные размеры машины, что даст выгоду при ее изготовлении».

Следует напомнить читателям, как Арнольд получил в 1896 г. аналитическое выражение машинной постоянной. Первая формула была получена для машины постоянного тока. Используем обозначения, принятые в настоящее время. В качестве исходного пункта Арнольд задался «главными размерами» электрической машины: длиной l_d (мм) и наружным диаметром D (мм) сердечника якоря. Именно ими определяются остальные размеры машины, а также ее масса, цена и другие технико-экономические характеристики. Далее Арнольдом было принято, что расчетная (внутренняя) мощность $P_{\Phi}(B\Phi)$, ток якоря I (А) и частота вращения n (об/мин) считаются заданными.

ЭДС якоря определялась по известной формуле Гисберга Каппа, который вывел ее всего несколькими годами ранее:

$$E = 4f w_b F = 4(pn/60)(w/2a)F,$$

где w_b и w – соответственно, число витков параллельной ветви и общее число витков обмотки якоря; Φ – магнитный поток в якоре, Вб; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; p – число пар полюсов.

Ток якоря и магнитный поток записывались как

$$I = (apDA)/10w;$$

$$F = a_d t l_d B_d \times 10^{-6} = a_d (pD) / (2p) l_d B_d \times 10^{-6},$$

где a_d – расчетный коэффициент полюсной дуги, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению t ; A – линейная нагрузка обмотки якоря, А/см; B_d – значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл.

Приведенные формулы подставлялись в выражение для расчетной мощности $P_{\Phi} = EI$, и в результате несложных преобразований получилось конечное выражение:

$$C_A = D^2 l_d n / P_{\Phi} = 6,1 \times 10^7 a_d B_d A.$$

Изящно и просто, как все гениальное. А вот результаты, получаемые при анализе этой формулы, могут занимать на порядки больше места, чем сам вывод. Пока электромагнитные нагрузки B_d и A остаются неизменными, правая часть равенства представляет собой константу. Таким образом, машинная постоянная характеризует степень использования электрической машины или массу активных материалов, отнесенную к мощности: чем меньше машинная постоянная, тем меньше размеры машины по отношению к ее мощности и выше ее электромагнитные нагрузки при заданных мощности и частоте вращения.

В конце 19 – начале 20 вв. уже существовало несколько методик предварительного расчета электромашин, авторы которых разрабатывали эмпирические и полуэмпирические формулы, определяющие размеры якоря в зависимости от мощности машины. В журнале «Электричество» за 1905 г. читаем: «Таких формул имеется теперь очень много. В некоторые из них входят величины, характеризующие машину с электрической точки зрения, например, сила тока (формулы Фишер–Гикенена и Сенгеля) и т.д., индукция в воздухе и зубцах (формулы Арнольда) и т.д., другие же ограничиваются исключительно задаваемыми величинами механического характера, например, мощностью, числом оборотов (например, формулы Каппа и Штейнмеца)... На континенте, особенно в Германии и Австрии, обыкновенно пользуются соотношением Арнольда, как теоретически лучше обоснованным» [37].

Постоянная Арнольда представляет собой первое в истории достаточно строгое оптимальное соотношение между размерами и электромагнитными нагрузками электрических машин. Из формулы видно, что при заданных C_A , A , B_d и a_d расход материалов тем меньше, чем больше n , т.е. машины с большей частотой вращения легче. Машинная постоянная зависит от электромагнитных нагрузок по меди (линейная нагрузка) и железу (индукция). На их выбор, в свою очередь, оказывают влияние и многие другие величины: КПД, температура, напряжение и т.п. Таким образом, соотношение Арнольда позволяет проводить анализ взаимного влияния целого ряда факторов на конструкцию и характеристики машины и наоборот. Практикой проектирования электрических машин установлены рекомендуемые значения A и B_d , однако с течением времени их корректируют в сторону увеличения. Это происходит в результате улучшения технологии производства и свойств активных материалов машин. Задаваясь значениями мощности, частоты вращения, электромагнитными нагрузками и конструктивными коэффициентами, определяется активный объем машины $D^2 l_d$. При пониженных значениях A и B_d машина имеет большие габаритные размеры, но высокий КПД, низкую температуру и продолжительный срок эксплуатации⁷. Наоборот, при повышенных значениях A и B_d габаритные размеры уменьшаются, при этом ухудшаются энергоэффективность и срок службы машины.

⁷ В настоящее время разработка таких высокоэффективных двигателей — весьма актуальная задача. Каждый дополнительный процент КПД требует увеличения массы активных материалов на 3–6%.

Активный объем машины $D^2 l_d$ представляет собой многочисленное число вариантов значений D и l_d , необходимо задаваться их соотношениями. Машина может быть «короткой», «средней» и «длинной». У первых лучше динамические свойства, более эффективно используются активные материалы, но есть опасность прогиба вала, они хуже охлаждаются. Кроме того, в коллекторных «длинных» машинах возникают проблемы коммутации из-за увеличенного значения реактивной ЭДС коммутируемых секций. Автор известной работы по расчету электрических машин В.П. Шуйский пишет: «... длинные машины, обычно, дешевле в изготовлении, но охлаждение их представляет известные трудности. Последнее, вообще говоря, ограничивает возможное увеличение длины машины. ... В настоящее время можно констатировать тенденцию к дальнейшему увеличению длины машины» [38].

Подход Арнольда к проектированию электрических машин получил дальнейшее развитие, появились машинные постоянные, в которых его исходная постоянная «преобразовывается» для конкретных целей. Так появились постоянные Эссона, Видмара, Рихтера, Шенфера, Кулебакина, Петрова, Руммеля и др. Существует машинная постоянная завода «Электросила» для асинхронных двигателей и гидрогенераторов и др. [39].

Постоянная Арнольда позволила проектировать машины с примерно минимальной массой, а в дальнейшем помогла разработать алгоритм оптимального проектирования по другим критериям, которые определялись областью применения и условиями эксплуатации машин различных типов и назначений. Эти методики и компьютерные программы стали главными элементами систем автоматизированного проектирования (САПР) электрических машин. Когда в послевоенное время была начата разработка единых серий асинхронных двигателей и коллекторных двигателей постоянного тока [40], отечественные специалисты создали и успешно использовали САПР серий 4А и 4П, АИ, РА и 5А. В настоящее время завершается работа над САПР новой серии эффективных асинхронных двигателей 7AVE [41]. Спроектированные с ее помощью машины некоторых габаритов уже осваиваются в производстве.

Алгоритмы оптимизации, использующие идеи Арнольда, позволяют решать такие важнейшие задачи как:

построение шкалы номинальных мощностей машин в серии и выбор коэффициента нарастания мощности;

экономическое обоснование шкалы габаритов, а в последующем высоты осей вращения;

унификация узлов и деталей машин при серийном и массовом производстве;

выбор числа полюсов внутри каждого габарита серийных и специальных машин (например, тяговых для электрического и гибридного автотранспорта);

определение оптимальной частоты в автономной энергетической системе с электрическими машинами;

разработка модификаций единой серии.

Кроме САПР асинхронных двигателей и машин постоянного тока общего назначения, отечественными специалистами были созданы и успешно используются рациональные алгоритмы оптимального проектирования синхронных генераторов [42, 43], трансформаторов и других электрических машин.

В практической работе инженеров-электромехаников часто возникает проблема выбора типа двигателя для электроприводов конкретных машин и механизмов. А сравнивать их можно прежде всего по плотности энергии в рабочем воздушном зазоре и по связанной с ней удельной массе. Кстати, ответ на вопрос, «какая машина лучше», до сих пор не найден, но искать его следует с учетом машинной постоянной Арнольда для каждого конкретного технического изделия той или иной электромеханической и энергетической системы.

Прогресс в теории и практике электромашиностроения продолжается. Но фундаментальные идеи Арнольда, бесспорно, способствовали в последующие десятилетия совершенствованию и разработке таких электрических машин, как синхронные турбо- и гидрогенераторы с различными системами охлаждения; со сверхпроводящими обмотками; линейные; погружные скважные; вентильные всех типов; с постоянными магнитами; индукторные; шаговые; гистерезисные; двигатели и генераторы для гибридных автомобилей; частотно-регулируемые двигатели переменного тока.

Сегодня требуют внимания исследователей методы оптимального проектирования электрических машин, работающих в постоянных (или частых) динамических режимах со стохастическими нагрузками, электронагревательных и перемешивающих устройств с вращающимся магнитным полем, микроэлектромеханических систем и др. По существу производными аналогами машинной постоянной Арнольда являются: динамическая постоянная рольганговых асинхронных двигателей [44]; электромагнитная добротность и магнитное число Рейнольдса у линейных электрических машин с твердым и жидким вторичным телом [45].

Все основные учебники и монографии по электрическим машинам на русском языке использова-

ли и развивали идеи трудов Арнольда и Рихтера и, разумеется, создавали свои собственные. Это прежде всего относится к широко известным в нашей стране представителям различных школ электромеханики: М.П. Костенко, Л.М. Пиотровскому, Д.А. Завалишину, А.И. Вольдеку, В.А. Толвинскому, А.И. Важнову, И.Д. Урусову, К.И. Шенферу, Г.Н. Петрову, Т.Г. Сорокеру, И.П. Копылову, А.В. Иванову-Смоленскому, П.С. Сергееву, О.Д. Гольдбергу, И.М. Постникову, Г.А. Сипайлову, Е.Я. Козловскому и многим другим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

33. Арнольд Э., Ла-Кур И.Л. Машины постоянного тока. — М.: Гостехиздат, 1931, т. 1 и 2.
34. Угримов Б.И. Памяти профессора Э. Арнольда. — Бюллетени общества электротехников, 1911, № 66.
35. Усатый С.Н. Памяти профессора Арнольда. — Изв. Санкт-Петербургского политехнического института, 1911, т. XVI.
36. Рихтер Р. Электрические машины. Т. 1. Расчетные элементы общего назначения. Машины постоянного тока/Пер. с нем. под ред. Ю.С. Чечета. — Л.: Объединенное научно-техническое изд-во НКТП СССР, 1935.
37. Троцкий И. Рецензия на кн. С. Томсона «Расчет и конструкция динамо-электрических машин». — Электричество, 1905, № 24.
38. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. — М.: Энергия, 1968.
39. Бергер А.Я. Выбор главных размеров электрических машин. — Л.: Энергия, 1972.
40. Гурин Я. С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978.
41. Кобелев А.С., Макаров Л.Н., Русаковский А.М. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий. — Электротехника, 2008, № 11.
42. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей. — М.: Высшая школа, 1988.
43. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
44. Шелехов С.А., Шелехова Т.С. Рольганговые электродвигатели серии АР. — М.: Энергия, 1977.
45. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. — М.: Энергоатомиздат, 1991.

Беспалов В.Я., Бородин Д.А., Бородин В.Д.

Р.С. Интересен факт о связи времен и преемственности поколений. Игорь Петрович Копылов, будучи студентом кафедры электрических машин, первые навыки экспериментальных исследований и изобретательства в области электромеханики получил у проф. К.И. Шенфера — ученика Э. Арнольда. Много лет спустя заведующий этой кафедрой МЭИ, профессор И.П. Копылов, приобщил к научно-исследовательской работе и был научным руководителем аспирантов — авторов этой статьи.